

論文 Article

セラミック軸受の高温寿命特性に関する研究（第1報）

— 高温・無潤滑における基本動定格荷重 —

原稿受付 2013 年 3 月 29 日

ものづくり大学紀要 第 4 号 (2013) 16~21

市川茂樹^{*1}, 川口悟史^{*2}, 瀬山知亮^{*3}^{*1} ものづくり大学 技能工学学部 製造学科^{*2} 航空自衛隊第1高射群整備補給隊^{*3} 株式会社 前川製作所

Studies on high-temperature life property of the ceramic bearing (Part 1)

— The basic load rating of the lubricating in high-temperature atmospheric air —

Shigeki ICHIKAWA ^{*1}, Satoshi KAWAGUCHI ^{*2} and Hajime SEYAMA ^{*3}^{*1} Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*2} JASDF 1st Air Defence Missile Group^{*3} MAEKAWA MFG.CO.,LTD

Abstract

Practical use level has the ceramic bearing which is superior in a high temperature characteristic, and it is important to demand the rating lift of the ceramic bearing under various conditions. On the other hand, the staircase method is one of the statistical life test methods, and sample number a fewer than a conventional test method and the practice for the short time are possible. In a report of the application of this staircase method, we discussed the rating lift of the ceramic bearings in the unlubricated conditions with a high-temperature in the atmospheric air.

Key Words: ceramic rolling bearings, life test, basic dynamic load rating, staircase method

1. はじめに

セラミック軸受は、現在NC工作機械の主軸部品やさまざまな特殊環境下で用いられ成果を上げている。今後は宇宙空間、高温および真空中などの分野でも利用が期待される。特に、従来の鋼製軸受では、利用出来ない高温、無潤滑の領域において実用化されれば冷却を必要としないため熱間圧延ロールの搬送用軸受から宇宙空間まで応用範囲は極めて広いと言える。さらに、タービンやエンジン部品への利用が可能となれば、原動機の効率改善や燃料の節約にも貢献することが予測される。

一方、実際のセラミック軸受は、常温での利用が主なもので本来の高温特性に優れるセラミック

スの特性を生かし切れていない現状がある。その理由は、セラミック製品の加工能率と信頼性に問題があるためである。高温域の利用を考えると軸受部品は、使用する温度域によって材質や潤滑方法を選択する必要がある。特に、高温域では、軸受材質の限界温度より潤滑剤の限界温度が低い点が問題となる。例えば、500℃以上の使用を考えたときには、無潤滑で摩耗特性に優れた材質を選択することになる。現在、これに最も近いものがセラミック軸受であると言える。将来の利用を考えると、高温、無潤滑における寿命評価とその評価方法を確立することが実用化を図る上で重要である。本研究は、さまざまな使用条件において、できるだけ少ないサンプル数でかつ短期間に精度良

く軸受の定格寿命等の諸数値を求める方法の実用化を目指している．本報告では，高温域における潤滑の有無や軸受材質について検討し，各種軸受の摩耗特性を明らかにするとともにステアケース法による定格寿命の諸数値を求め基本データの構築を図る．

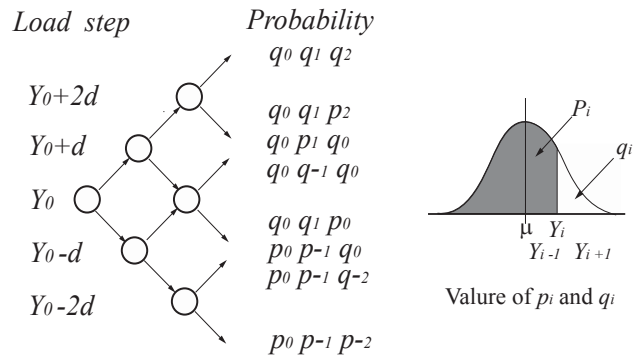
2. ステアケース法による寿命試験

2.1 試験方法および手順

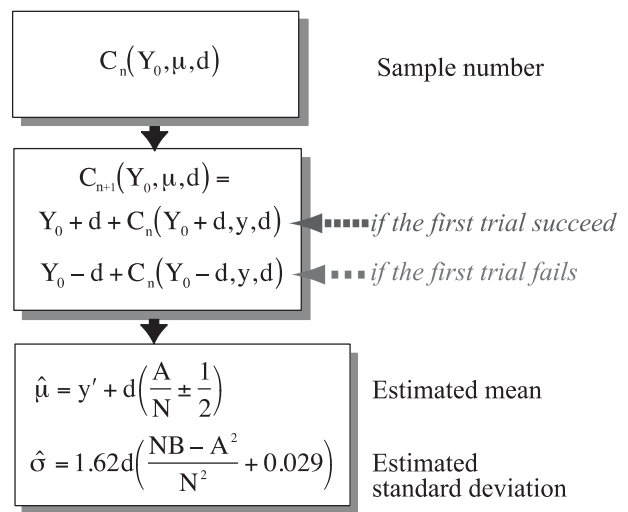
図 1 i) は，3 個のサンプルを用いてステアケース法を実施したときの試験方法とそのときの確率を示す．図中の正規分布における p_i は破壊した確率， q_i は未破壊の確率であり，最初に参考となるデータから μ に近いと思われる第 1 番目の荷重 Y_0 で試験を実施する．このときに条件で定めた打ち切り回数までに試験片が破壊したなら荷重を d だけ下げ，逆に未破壊であったなら荷重を d だけ上げて第 2 番目の試験を実施する．この操作を用意したサンプル数のすべてについて実施する．試験終了後，破壊あるいは未破壊のサンプル総数の少ない方を用いて図 1 ii) で示す平均，標準偏差の期待値を計算する．次に，得られた平均，標準偏差の期待値を用いて破壊確率 10% の値を計算し，これを基本動定格荷重¹⁾²⁾³⁾とする．

2.2 サンプル数と平均，標準偏差の期待値

これまでに K. A. Brownlee⁴⁾ の研究を参考に著者等⁵⁾ は，サンプル数 $n=20$ までの平均および標準偏差の期待値を計算し，その妥当性を明らかにしてきた．当初，サンプル数 $n=20$ は実際に用意することが可能なサンプル数と試験に要する時間，労力を勘案して決定していたが，実際には，次のような場合に 21 番目以降の試験を実施する必要があった．例えば σ に対して実際に荷重階差を小さく取った場合や第 1 番目の荷重が μ から大きく離れた場合などである．このような場合には，これまで 21 番目以降も同様の試験を実施し，得られた結果からサンプル数に応じて推定平均，推定標準偏差を算出し，一定の精度を得るまで試験を継続した．以上の結果から，もう少し大きなサンプルサイズの精度について計算する必要があると考え，新たにサンプル数 $n=24$



i) Probability in staircase method



ii) Calculation procedure in the sample size

Fig.1 Estimation of $\hat{\mu}$ and $\hat{\sigma}$ by staircase method

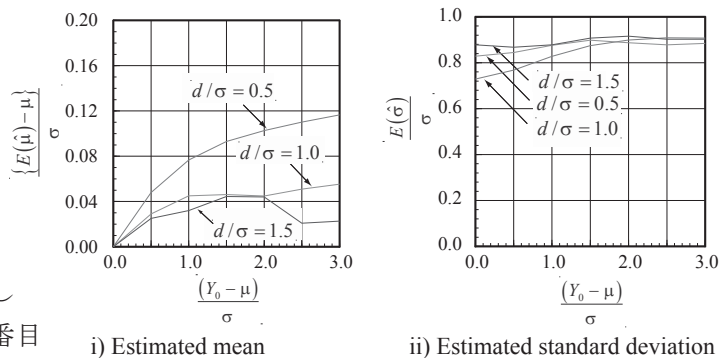


Fig.2 Expected value $\hat{\mu}$ and $\hat{\sigma}$ with $n=24$

のサンプルサイズについて計算を行った．ステアケース法の確率計算の手順は，図 1 ii) より，打ち切り回数までに破壊あるいは未破壊である確率が図 1 i) の正規分布の p_i, q_i に従うとすると， n 個のサンプルがとる確率は 2^n 通りである．図 1 i) 中の $n=3$ の場合は，全部で 8 通りの確率となる． n 個のすべての確率を計算した後，破壊あるいは未

破壊のサンプル総数の少ない方のサンプルを用いて推定平均、推定標準偏差を求めた。図2 i), ii) は、 $d/\sigma=0.5, 1.0, 1.5$ としたときのサンプル数 $n=24$ の推定平均、推定標準偏差の分布を示している。推定平均の分布は左右対称であるので、ここでは Y_0 が μ から $\mu+3\sigma$ まで変化したときの推定平均とした。 $d/\sigma=1.0$ 以上で推定平均は極めて μ に近づくことがわかる。推定標準偏差においても個数を増すことで推定平均と同様に σ に近づくことがわかる。荷重階差を小さく取った場合の $d/\sigma=0.5$ は別とすれば、 $d/\sigma=1.0, 1.5$ の範囲で、以前のサンプル数 $n=20$ が約 0.8σ であるのに対し、 $n=24$ では 0.9σ まで向上することがわかる。

2.3 試験装置および試験条件

試験装置および計測の構成を図3に示す。軸受試験片は、図中の上回転軸と下荷重軸間に設置した。荷重は、潤滑および無潤滑条件で分けて考え、潤滑ではエアサーボ方式、無潤滑では錘を用いた静荷重方式とした。軸受を設置した炉の軸受周辺部内壁にはグラファイトカーボンを用い大気雰囲気中 200°C とした。試験中の軸受の挙動特性は、下荷重軸の底部に設置したロードセル、渦電流式変位センサおよびトルク計の出力をパソコンに取り込みデータ処理を行った。試験に用いた軸受の寸法形状および材質を図3付図に示す。軸受は、市販のスラスト玉軸受 (51103) 形状で要素部品の材質から全てが SUJ-2, SUS440C および転動体 Si_3N_4 /周動盤 SUS440C を組合せた3種類とした。試験条件を表1に示す。大気雰囲気 200°C における潤滑では、ウレアグリースを用い試験開始前に充填した後は、試験中の補給は行わないものとした。一方、無潤滑条件では軸受をアセトンで洗浄後、大気雰囲気中 200°C で同様の試験を実施した。

3. 大気雰囲気中 200°C における軸受の高温摩擦摩耗特性

3.1 グリース潤滑による軸受の摩擦摩耗特性および各要素部品の破損

図4 i), ii) は、 Si_3N_4 /SUS440C 材質の軸受を用いて試験を実施したときの繰り返し数に対する摩

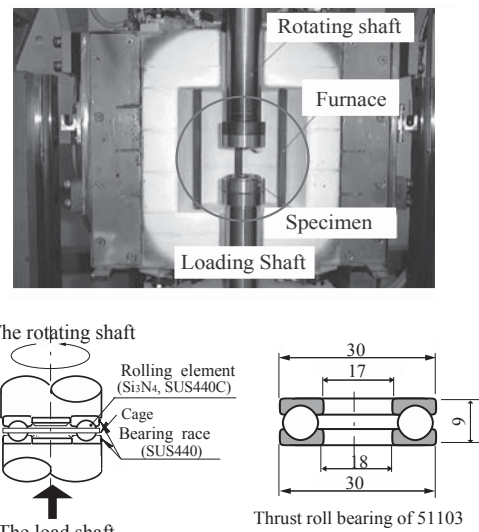


Fig.3 Life test apparatus for the high-temperature range

Table 1 Life test conditions

Ball number	3
Revolution speed	680 rpm
Lubricant	Unlubricating lubricating
Temperature	200°C
Interrupted load cycle	10^6

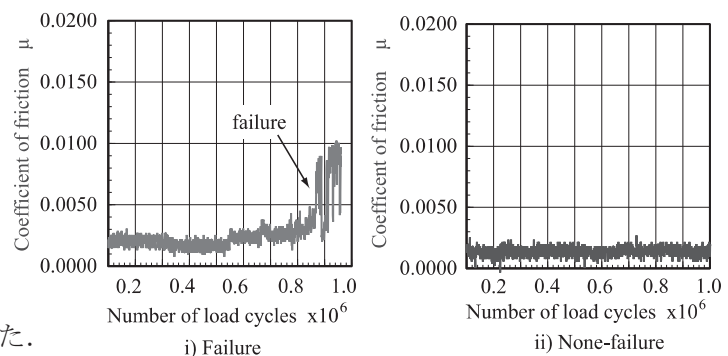


Fig.4 Life judgment of the rolling ball bearing

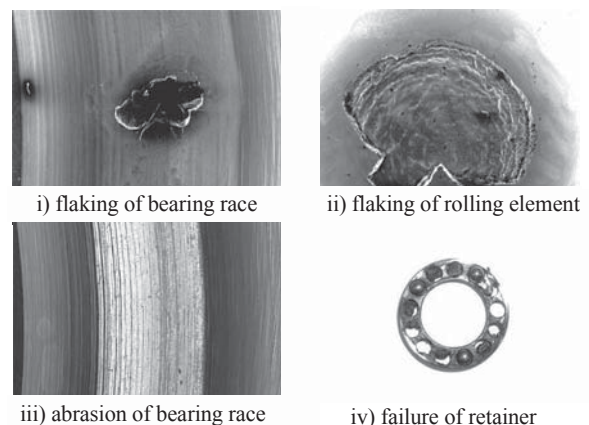


Fig.5 Failure characteristic of bearing component at atmospheric 200 degrees

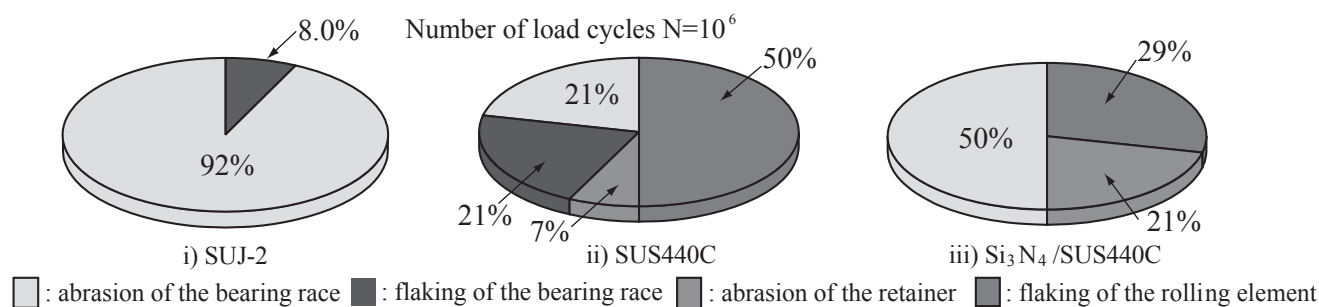


Fig.6 Failure mode of the component in the rolling ball bearings

摩擦係数を示す．図 4 i) は，打ち切り回数 10^6 までに摩擦係数が急激に変化し寿命に至る破壊の場合である．図 4 ii) は打ち切り回数内で摩擦係数の急激な変化を伴わない未破壊の場合である．潤滑における摩擦係数の変動は，同一材質の SUJ-2，SUS440C に比べ異種材質の組合せ Si_3N_4 /SUS440 が僅かに大きくなる傾向を示した．これは，転動体 Si_3N_4 と転がり接触する周動盤，保持器との摩耗形態が異なるためと推測される．軸受の寿命は，フレーキングによる疲れ寿命と摩耗により要素部品が破損に至る摩耗寿命に区分できる．

図 5 i), ii), iii), iv) は，SUS440 軸受における各要素部品（周動盤，転動体および保持器）に生じた破壊状態の例を示す．図 5 i), ii) は，周動盤，転動体に生じたフレーキングが破壊の原因となる場合，図 5 iii) は主に周動盤の摩耗が破壊の原因となる場合である．図 5 iv) は転動体と保持器が接触する部分から保持器が破壊した場合である．図 5 i), ii), iv) の要素部品では，破壊に至ると摩擦係数は急激に変動する．図 5 iii) の摩耗寿命においても発生した摩耗粉は転がり要素部品間の隙間に入ると図 4 i) に示す変動曲線となり，摩擦係数は激しく変動し破壊に至る．図 6 i), ii), iii) は，繰返し数 $N=10^6$ までに破壊したサンプルを図 5 に基づいて軸受部品の破壊原因を 4 つの破壊区分で整理したものである．SUJ-2 材質では，92% が保持器の摩耗による破壊であり， Si_3N_4 /SUS440C 材質では，50% が周動盤の摩耗，29% が転動体のフレーキングおよび 21% が保持器の摩耗となり，主に摩耗による破壊が支配的と推測される．SUS440C 材質では， Si_3N_4 /SUS440C 材質と SUJ-2 材質との中間的な破壊形態で，周動盤の摩耗とフレーキングの割合が 21% と同値となり，フレーキングが 50% となる転動体が主な破壊原因となる．

3.2 無潤滑による軸受の摩擦摩耗特性および各要素部品の摩耗・破損

無潤滑における摩擦摩耗特性は，潤滑の場合と同様，転動体と周動盤および保持器との転がり摩擦により発生する摩耗粉が接触面に介在し破壊に至る摩耗寿命である．無潤滑では，軸受の繰返し数に比例して各要素部品は摩耗する．発生した摩耗粉は，転がり面に介在しなければ直接の破壊原因とはならないが，摩耗粉が転がり面にあると要素間で摩擦係数の急激な変動を生じ破壊に至る．無潤滑による寿命の判定も図 4 i), ii) と同様に摩擦係数の変動により判定することができる．

4. 高温域における各材質軸受の寿命

4.1 グリース潤滑による場合

図 7，図 8 および図 9 は，SUJ-2，SUS440C， Si_3N_4 /SUS440C 材質についてステアケース法を実施したときのチャートを示す． Si_3N_4 /SUS440C，SUS440C の試験条件は，第 1 番目の荷重 $Y_0=2.5\text{kN}$ ，荷重階差 $d=0.2\text{kN}$ とし，サンプル数は SUS440C が 25 個， Si_3N_4 /SUS440C が 20 個とした．SUJ-2 では第 1 番目の荷重 $Y_0=2.44\text{kN}$ ，荷重階差 $d=0.1\text{kN}$ お

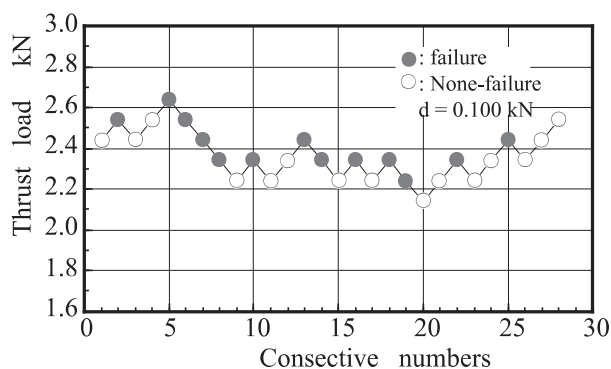


Fig.7 Staircase chart for steel bearings(SUJ-2) at atmospheric 200 degrees

よびサンプル数 28 個とし、それぞれの試験を実施した。例えば、 Si_3N_4 材質の場合で説明すると試験結果から、破壊 11 個、未破壊 9 個であったので、少ない個数である未破壊のデータを用いて、まず推定平均および推定標準偏差を計算し、次にこの値を用いて基本動定格荷重を求めた。それぞれの軸受について得られた結果を表 2 に示す。基本動定格荷重を比較すると $\text{SUJ-2} > \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C} > \text{SUS440C}$ の順となる。 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$ のような異種材料の組み合わせでは推定標準偏差は大きくなる傾向を示す。得られた結果から d/σ を求めると $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$ で $d/\sigma = 0.66$, SUS440C で $d/\sigma = 0.79$ および SUJ-2 では $d/\sigma = 0.53$ となり、図 2 における $d/\sigma = 0.5 \sim 1.0$ の範囲の期待値をとることがわかる。 SUJ-2 材質の基本動定格荷重を 1 とすると大気雰囲気 200℃の値は SUS440C 材質で 83.9%, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$ 材質で 89.6% 減少する。

4.2 無潤滑による場合

高温、無潤滑では、ステアケース法を実施するにあたり参考となる荷重データが無いので、新たに 8 個のサンプルを用意して第 1 番目の荷重 Y_0 , d を求める方法を検討した。一般に、統計的な疲労試験の信頼性は、多数の試験片を用意し S-N 曲線を求めなければならないが、傾斜部のみであれば 14S-N 試験法⁶⁾の傾斜部が利用できる。ステアケース法の第 1 番目の荷重 Y_0 をできるだけ μ の近くに選ぶために、傾斜部の直線性の検定を用いる。これまでに傾斜部では、片対数座標上で直線にしたがい、かつ繰り返し数 N の対数正規分布では $\log N$ の分散 σ^2 は荷重段階には依存しない。同様に荷重の正規分布でも荷重の分散 σ^2 は繰り返し数 N に依存しないことが実験的に知られている。そこで、打ち切り回数 10^6 までにはならず破壊が予測される荷重範囲を等間隔に任意の 4 段階に分け、各荷重段階でそれぞれ 2 個の試験を実施し破壊に至るまでの繰り返し数 N を求める。図 10 は $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$ 材質を用いた傾斜部の結果を示している。傾斜部の近似直線から繰り返し数 $N=10^6$ を与える荷重を求め、これをステアケース法における第 1 番目の荷重 Y_0 とし、このときの標準偏差 σ を荷重階差 d とした。図 11 および図 12 は、高温、無潤滑でステアケー

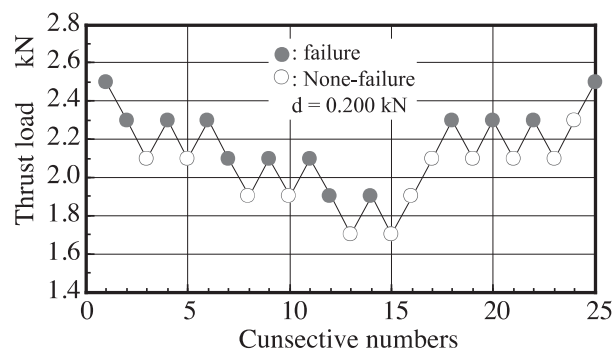


Fig.8 Staircase chart for stainless bearings(SUS440C) at atmospheric 200 degrees

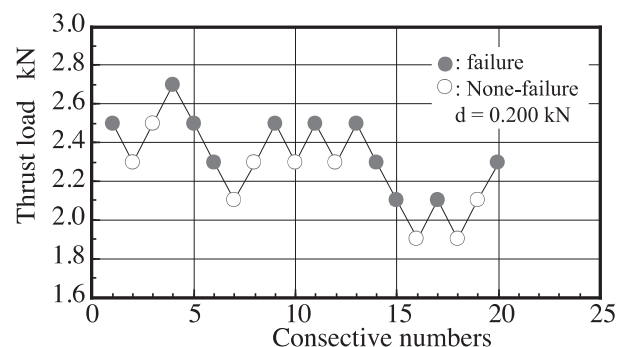


Fig.9 Staircase chart for ceramic bearings($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$) at atmospheric 200 degrees

Table 2 The basic load rating at atmospheric 200 degrees

Materials	Unit : kN		
	Si_3N_4 / SUS440C	SUS440C / SUS440C	SUJ-2 / SUJ-2
Mean life load F_{50}	2.289	2.100	2.359
Standard deviation	0.305	0.252	0.189
95 % confidence limits for F_{50}	Lower	1.987	2.263
	Upper	2.213	2.455
Expected level for 90 % life load F_{10}	1.898	1.777	2.118

Results of 14S-N testing method

No.	Thrust load (N)	Number of cycles
1	66	39.12×10^4
2	66	48.02
3	59	59.00
4	59	46.12
5	52	65.26
6	52	79.22
7	45	97.64
8	45	81.04

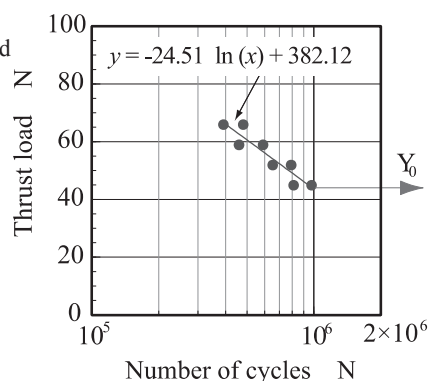


Fig. 10 SN curve (a high load portion) of the wear life by the 14-SN test method

ス法を実施したときのチャートを示している。試験条件は、図 10 の方法を用い $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$ 材質では、第 1 番目の荷重 $Y_0=45\text{N}$, 荷重階差 $d=3\text{N}$ およびサンプル数 $n=24$ とし、 SUS440C 材質では、第

1 番目の荷重 $Y_0=17\text{N}$, 荷重階差 $d=4\text{N}$ およびサンプル数 $n=23$ として試験を実施した. 試験結果から, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$ 材質では破壊 14 個, 未破壊 10 個, SUS440C 材質では破壊 10 個, 未破壊 13 個より, それぞれ少ない方のデータを用いて計算した結果を表 4 に示す. 基本動定格荷重を比較すると, その大きさは $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C} > \text{SUS440C}$ となり, Si_3N_4 転動体の有意差が認められる. 得られた結果をもとに d/σ を求めると, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$ 材質では $d/\sigma=0.91$, SUS440C 材質では 0.98 となり, その精度は図 2 中のほぼ $d/\sigma=1$ 近傍にあることがわかる. 200°C , 無潤滑では, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$ 材質と SUS440C 材質を比較した場合 SUS440C 材質に対し $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$ 材質は 1.46 倍の基本動定格荷重となる.

5. まとめ

$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$, SUS440C および SUJ-2 材質の軸受を用いて高温摩擦摩耗特性を調べるとともにステアケース法による高温寿命特性を評価し, 以下の結果を得た.

- (1) 大気中 200°C , 潤滑における寿命に至る主な破壊原因は, SUJ-2 材質の 92% および $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$ 材質の 50% が周動盤の摩耗である. SUS440C 材質では, 50% が転動体のフレーキングである.
- (2) 大気中 200°C , 無潤滑における摩擦摩耗特性は, SUS440C , $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$ の材質とも破壊に至る原因は摩耗である.
- (3) 基本動定格荷重は, 200°C , 潤滑で SUJ-2 材質が最も大きく, 200°C , 無潤滑では, SUS440C 材質に比べて $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$ 材質の基本動定格荷重は, 高温特性に優れている.

文 献

- 1) 市川茂樹, ジュハルトノ, 小奈 弘, 吉本 勇: ステアケース法を用いた転がり軸受の寿命試験, 日本機械学会論文集(C編), 62, 595, (1996) 1033.

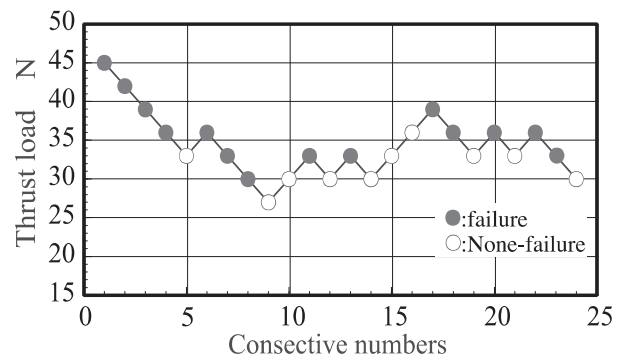


Fig. 11 Staircase chart for ceramic bearings($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$) in unlubricating at atmospheric 200 degrees

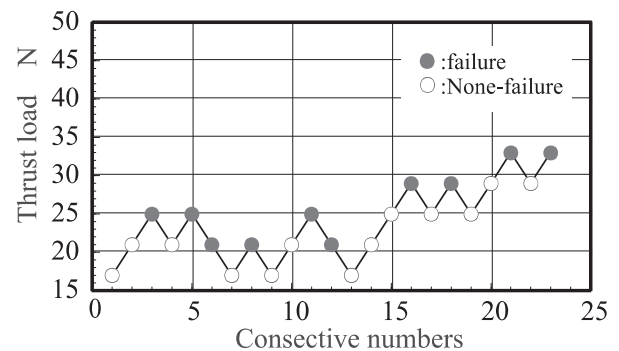


Fig. 12 Staircase chart for stainless bearings(SUS440C) in unlubricating at atmospheric 200 degrees

Table 3 The basic load rating in unlubricating at atmospheric 200 degrees

Materials	Unit : N	
	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS440C}$	$\text{SUS440C}/\text{SUS440C}$
Mean life load F_{50}	33.0	22.5
Standard deviation	3.0	4.1
95 % confidence limits for F_{50}	Lower	19.1
	Upper	26.0
Expected level for 90 % life load F_{10}	28.8	17.2

- 2) ISO281 Rolling bearings-Dynamic load rating life,(1990).
- 3) JIS B1518:転がり軸受の動定格荷重及び定格寿命の計算方法,(1992).
- 4) K.A.Brownlee,J.L. Hodges and M. Rosenblatt:J.Amer.Stat. Assn.,8(1953),262.
- 5) 市川茂樹, ジュハルトノ, 小奈 弘, 吉本 勇: ステアケース法によるセラミック玉軸受の寿命試験, 精密工学会誌, 61, 12 (1995) 1740.
- 6) JSME S2002:統計的疲労試験方法(改訂版), 日本機械学会(1994).
- 7) 市川茂樹, 小奈 弘: 高温におけるセラミック軸受の寿命試験, 2001 年精密春期講演, pp393, 2001.
- 8) 市川茂樹: 高温, 無潤滑におけるセラミック軸受の寿命試験, 2003 年精密春期講演, M79, 2003.